УДК 519.6

ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНФОРМАЦИОННО-МОДЕЛИРУЮЩИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА

А.А. Жиганов, М.Д. Носков, А.Д. Истомин, А.Г. Кеслер, Н.С. Невзорова

Северский государственный технологический институт
E-mail: nmd@ssti.ru

Представлен геотехнологический информационно-моделирующий комплекс, предназначенный для оптимизации добычи урана методом подземного выщелачивания. Комплекс включает в себя геотехнологическую информационную и моделирующую системы. Геотехнологическая информационная система позволяет вводить, редактировать и отображать параметры, характеризующие состояние продуктивного горизонта, а также характеристики технологических скважин. Моделирующая система описывает физико-химические процессы, происходящие в продуктивном горизонте при подземном выщелачивании урана. Комплекс может быть использован для оптимизации разработки месторождений урана методом подземного выщелачивания с целью повышения рентабельности разработки месторождений, увеличения доли извлекаемого урана и снижения экологической нагрузки на окружающую среду.

Методом подземного выщелачивания (ПВ) разрабатывают экзогенные месторождения урана, которые находятся в хорошо проницаемых подземных водоносных горизонтах [1–3]. Извлечение урана из рудного тела происходит через систему технологических скважин. Через нагнетательные скважины в продуктивный горизонт нагнетается раствор веществ, способных растворять содержащие уран минералы. Образующийся в подземном водоносном горизонте продуктивный раствор извлекается через откачные скважины. Образующиеся после переработки продуктивных растворов маточные растворы доукрепляются выщелачивающими реагентами и снова подаются в нагнетательные скважины в качестве рабочих растворов.

Основными задачами управления геотехнологическим предприятием является повышение рентабельности разработки месторождения, увеличение доли урана, извлекаемого из продуктивного горизонта, и снижение загрязнения подземных вод. Для решения этих задач нужно уметь оценивать оставшиеся запасы урана, располагать информацией о

геохимическом состоянии продуктивного горизонта и подземных вод, а также иметь возможность прогнозировать различные варианты развития предприятия и сравнивать различные способы разработки месторождения. То есть, необходима развернутая во времени модель предприятия, позволяющая выбирать оптимальный способ разработки месторождения [4, 5]. В настоящей работе предлагается геотехнологический информационно-моделирующий комплекс (ГТИМК), предназначенный для оптимизации добычи урана методом ПВ.

В основу работы комплекса положено взаимодействие геотехнологической информационной и моделирующей систем. Геотехнологическая информационная система предназначена для отображения пространственно-временных и атрибутивных данных на карте рассматриваемой территории. Визуальное представление информации базируется на цифровой модели продуктивного горизонта, организованной в виде совокупности слоев и объектов, привязанных к единой системе координат. Под слоем понимается распределение какой-либо физической величины в рассматриваемой области. Объекты геотехнологической информационной системы представляют собой цифровые аналоги наблюдательных и технологических скважин и содержат набор индивидуальных атрибутов-параметров, характеризующих реальный объект. Все слои и объекты геотехнологической информационной системы делятся на четыре модуля: геологический, гидрогеологический, минералого-геохимический и технологический. Геологический модуль содержит слои данных, характеризующих геологическое строение месторождения и физические свойства вмещающей породы (глубина залегания, мощность продуктивного горизонта, расположение рудного тела и т.д.). В минералого-геохимический модуль входят слои, включающие в себя данные о начальном распределении минералов в продуктивном горизонте и компонентов, растворенных в пластовых водах. Также в него включены кинетические коэффициенты и параметры равновесия, характеризующие физико-химические процессы, протекающие в системе. В гидрогеологический модуль включены слои, содержащие данные о распределении фильтрационных параметров продуктивного горизонта (проницаемость среды, пористость, вязкость). Кроме того, в нем содержатся данные об условиях питания и разгрузки подземного водоносного горизонта. Объекты геотехнологической информационной системы, являющиеся цифровыми аналогами технологических объектов предприятия (скважин), сгруппированы в технологическом модуле. Также в технологическом модуле содержится информация о режимах работы нагнетательных и откачных скважин и составах рабочих растворов.

Моделирующая система основывается на комплексной математической модели многокомпонентной фильтрации и состоит из двух блоков, описывающих гидродинамические и физико-химические процессы. Гидродинамический блок включает в себя расчет распределения давления и фильтрационных потоков в приближении жесткого режима фильтрации. Гидродинамические расчеты выполняются с учетом режимов работы технологических скважин, неоднородности фильтрационных параметров продуктивного горизонта и регионального потока подземных вод. В химический блок включены расчеты процессов растворения урансодержащих минералов рабочим раствором, потерь кислоты в результате взаимодействия с кислотопоглощающими минералами, переотложения минералов, комплексообразования, сорбции и десорбции. При расчетах учитывается неоднородность минералогического строения породы, кинетика взаимодействия рабочего раствора с различными минералами, неоднородность состава подземных вод и переменный состав растворов, закачиваемых в продуктивный горизонт.

Комплексная математическая модель описывает фильтрацию многокомпонентного раствора в тонком ненаклонном пласте переменной мощности (плановая фильтрация). Гидродисперсия учитывается с помощью приближения двойной пористости [6]. Согласно данному подходу вся пористость представляется в виде суммы проточной m_1 и застойной m_2 частей ($m=m_1+m_2$). Проточными порами называются поры, по которым жидкая фаза способна двигаться под действием градиента давления. Застойными порами называются поры, содержащие жидкость, не участвующую в адвективном движении. Часть жидкости, находящаяся в проточных порах, называется мобильной, а в застойных – иммобильной. Рассматриваемая в модели система состоит из четырех частей: мобильная часть жидкой фазы (1), иммобильная часть жидкой фазы (2), вмещающая порода, граничащая с мобильной частью жидкой фазы (3), вмещающая порода, граничащая с иммобильной частью жидкой фазы (4). Сжимаемость жидкости и минерального скелета породы не учитывается, так как эти эффекты незначительны и не оказывают существенного влияния на абсолютную проницаемость пористой среды, а также не приводят к превращению проточных пор в застойные (или застойных пор в проточные). Скорость фильтрации $\vec{U}$ жидкости по проточным порам определяется законом Дарси [6, 7]:

$$\vec{U} = -\frac{k}{\mu}\,\mathrm{grad}\,(P),$$

где P – давление; μ – вязкость жидкости; k – коэффициент проницаемости среды. Распределение давления рассчитывается с помощью закона неразрывности потока жидкости в приближении жесткого режима фильтрации [8]:

$$\mathrm{div}(H\vec{U}) = Q,$$

где H – мощность пласта; Q – плотность мощности источников и стоков жидкости. В качестве источников и стоков жидкости выступают нагнетательные и откачные скважины.

Процессы растворения и осаждения минералов в системе сернокислотный раствор – вмещающая порода, в общем случае, описываются уравнениями формальной кинетики для параллельных и последовательных химических реакций. Однако в настоящее время характер взаимодействия серной кислоты с большинством минералов, составляющих вмещающую породу подземных водоносных горизонтов, недостаточно хорошо изучен. Также неизвестны многие кинетические и равновесные параметры уравнений, описывающих эти взаимодействия. В настоящей модели используется подход, основанный на выделении ограниченного числа минералов, компонентов и процессов, которых достаточно для описания взаимодействия вмещающей породы с серной кислотой. При этом реальные процессы, происходящие в подземных водоносных горизонтах, заменяются эффективными, описание которых позволяет учесть выход урана в раствор и убыль серной кислоты. В модели рассматриваются восемь групп минералов, которые различаются по составу (содержащие шестивалентный или четырехвалентный уран, кальций и др.) и скорости взаимодействия с раствором серной кислоты. При описании жидкой фазы рассматривается поведение одиннадцати компонентов (UO_2^{2+}, U^{4+}, H^+, SO_4^{2-}, Ca^{2+}, сульфатные комплексы уранила, урана и др.). Динамика концентраций всех компонентов в различных частях системы, за исключением иона водорода, описывается системой уравнений [9]:

$$m_1\frac{\partial C_1^i}{\partial t} = -\mathrm{div}(C_1^i U) - J_{12}^i - J_{13}^i - \sum_{j=1}^{8} J_{13}^{ij},$$

$$m_2\frac{\partial C_2^i}{\partial t} = J_{12}^i - J_{24}^i - \sum_{j=1}^{8} J_{24}^{ij},$$

$$\frac{m_1}{m}(1-m)\frac{\partial N_3^i}{\partial t} = J_{13}^i,\ \frac{m_2}{m}(1-m)\frac{\partial N_4^i}{\partial t} = J_{24}^i,$$

$$\frac{m_1}{m}(1-m)\frac{\partial C_3^{ij}}{\partial t} = J_{13}^{ij},\ \frac{m_2}{m}(1-m)\frac{\partial C_4^{ij}}{\partial t} = J_{24}^{ij},$$

где C_Φ^i – концентрация i-ого компонента в жидкой фазе (части системы Ф=1,2); N_Φ^i – концентрация i-ого компонента, сорбированного на поверхности (Ф=3,4); C_Φ^{ij} – содержание i-ого компонента в j-ом минерале в части Ф (Ф=3, 4); J_{12}^i – плотность потока i-ого компонента из мобильной части жидкой фазы в иммобильную; J_{13}^i (J_{24}^i) – плотность потока i-ого компонента из мобильной (иммобильной) части жидкой фазы на контактирующую с ней поверхность породы в результате сорбции (десорбции); J_{13}^{ij} (J_{24}^{ij}) – плотность потока i-ого компонента из мобильной (иммобильной) части жидкой фазы в j-ый минерал соответствующей части твердой фазы в результате процессов растворения ($J_{\Phi\Phi+2}^{ij}>0$) или осаждения ($J_{\Phi\Phi+2}^{ij}<0$). Концентрация иона водорода определяется из условия электронейтральности раствора. Плотность потока J_{12}^i между мобильной и иммобильной частями жидкой фазы принимается пропорциональной разнице концентраций компонентов:

$$J_{12}^i = \alpha^i (C_1^i - C_2^i),$$

где α^i – постоянная скорости массообмена. Плотность потока i-ого компонента $J_{\Phi\Phi+2}^{ij}$ из часть жидкой фазы (Ф=1, 2) в граничащую с ней часть твердой фазы Ф+2 в следствие осаждения (растворения) j-ого минерала определяется уравнением:

$$J_{\Phi\Phi+2}^{ij} = \alpha_-^j \theta(\Delta F_\Phi^i)\Delta F_\Phi^i + \alpha_+^j (S_{уд})_\Phi^j \theta(-\Delta F_\Phi^i)\Delta F_\Phi^i \quad (\Phi=1,2)$$

где ΔF_Φ^i – движущая сила массопотока i-ого компонента; $\alpha_-^j(\alpha_+^j)$ – постоянная скорости осаждения (растворения) j-ого минерала; $(S_{уд})_\Phi^j$ – удельная поверхность j-ого минерала; $\theta(x)$ – ступенчатая функция ($\theta(x)=0$ при $x<0$ и $\theta(x)=1$ при $x\geq 0$). В модели предполагается, что движущая сила ΔF_Φ^i массопотока i-ого компонента в результате осаждения ($\Delta F>0$) или растворения ($\Delta F<0$) минералов определяется отклонением активности этого компонента в жидкой фазе от равновесного значения. Равновесные значения активностей компонентов являются функцией концентрации ионов водорода в соответствующей части жидкой фазы. Плотность массопотока i-ого компонента $J_{\Phi\Phi+2}^i$ в часть Ф жидкой фазы из части Ф+2 твердой фазы в результате физической сорбции (десорбции) описывается в рамках приближения линейной кинетики:

$$J_{\Phi\Phi+2}^i = -\alpha_S^i (C_{P,\Phi}^i - C_\Phi^i), \qquad (\Phi=1,\ 2)$$

где $C_{P,\Phi}^i$ – равновесная концентрация i-ого компонента в растворе для процесса адсорбции (десорбции); α_S^i – константа скорости адсорбции (десорбции) i-ого компонента.

ГТИМК создан на языке Borland Builder C++ и представляет собой проблемно-ориентированное, многопоточное, многооконное, 32-битное программное обеспечение, работающее под управлением операционной системы Windows 98–XP. Использование средств интерфейса операционной системы Windows при разработке ГТИМК предоставляет пользователю возможность работы со стандартными объектами – окнами, списками, таблицами, которые легко связываются с базами данных и отображаются на экране монитора. Интерфейс ГТИМК включает в себя элементы управления – кнопки, переключатели, флажки, меню, всплывающие подсказки на русском языке.

Запуск программы активизирует главное окно, содержащее заголовок, панель меню, панель инструментов, рабочую область, статус-строку, отображающую контекстные подсказки, расчетное время, координаты положения курсора на карте, текущее системное время. Главное окно приложения предназначено для работы с проектом, представляющим собой некоторую совокупность пространственно-атрибутивной информации о полигоне ПВ, геологическом, минералогическом строении и временной эволюции состояния продуктивного горизонта. Ввод и редактирование данных, управление расчетом и представление результатов, сохранение данных осуществляются с помощью блоков управления проектом, управления объектами геоинформационной системы и параметрами моделирования, визуализации данных, управления расчетом, обработки команд (рис. 1).

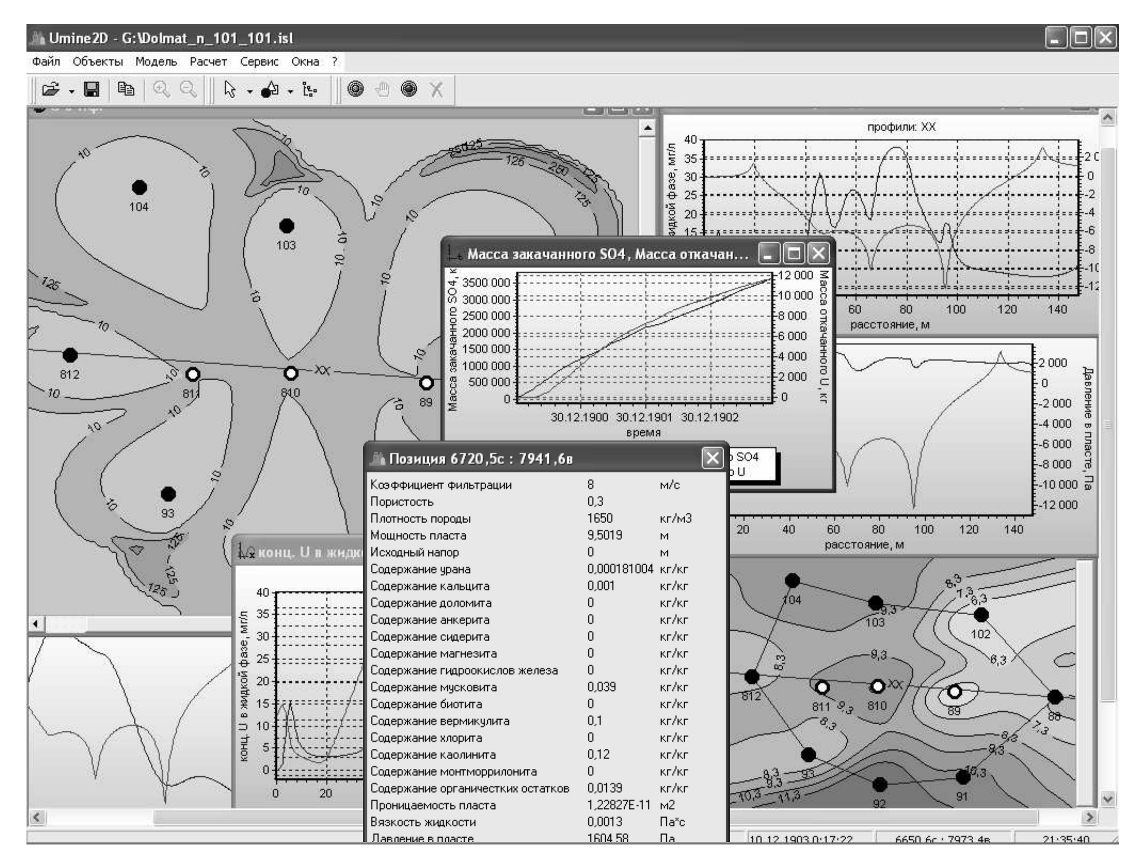


Рис. 1. *Вид рабочего окна геотехнологического информационно-моделирующего комплекса для оптимизации добычи урана методом ПВ*

Блок управления объектами геоинформационной системы и параметрами моделирования предназначен для ввода и редактирования геологических, гидрогеохимических, минералогических и технологических данных о продуктивном горизонте, положении и режимах работы скважин и составах закачиваемых растворов. Кроме этого возможно редактирование параметров математической модели процесса ПВ. Блок управления расчетом позволяет запускать процесс моделирования, приостанавливать, останавливать или прерывать расчет, а также обеспечивает передачу данных в блок визуализации. Блок визуализации данных предназначен для отображения на карте местности скважин, реперов, сечений, изолиний, а также для управления режимом отображения данных в главном и дочерних окнах. Результаты моделирования представляются блоком визуализации данных в виде картин пространственного распределения исходных и текущих концентраций компонентов в жидкой и твердой фазах, содержаний минералов, параметров состояния продуктивного горизонта (пористость, мощность и др.) и профилей физических величин вдоль задаваемых пользователем сечений. Возможен вывод временных зависимостей значений физических величин в заданных точках (скважинах или реперах), а также технологических показателей по скважинам и по полигону в целом.

Применение ГТИМК для проектирования и управления разработкой месторождения методом ПВ должно осуществляться в несколько этапов. На первом этапе создается цифровая модель продуктивного горизонта. Предполагается, что к этому моменту проведены геологоразведочные работы, исследованы химические свойства вмещающей породы и подземных вод, накоплено достаточно информации о состоянии месторождения. Имеющиеся сведения, характеризующие минералогический состав продуктивного горизонта, его гидрологические и геологические свойства, а также другие параметры месторождения заносятся в базу данных. Далее генерируются распределения физических величин во всей рассматриваемой области. Результаты экстраполяции анализируются специалистами, при необходимости производится пополнение исходных данных и повторная генерация. На этом же этапе проводится определение параметров моделирования физико-химических процессов. Параметры моделирования определяются по результатам лабораторных экспериментов и на основе данных опытных и опытно-промышленных работ. Результатом первого этапа проектирования разработки месторождения должны являться цифровая модель продуктивного горизонта и набор физико-химических параметров моделирования. По результатам первого этапа подготавливается технико-экономическое обоснование, содержащее результаты подсчета запасов урана, данные о фильтрационных и минералогических свойствах вмещающей породы

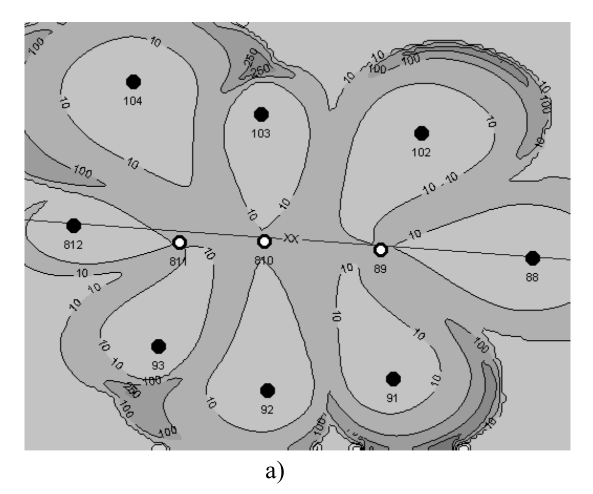
и выводы о целесообразности промышленного освоения месторождения.

Если разработка месторождения признана рентабельной, то нужно спланировать размещение технологических скважин. Создание цифровой модели предприятия осуществляется на втором этапе. Цифровая модель предприятия включает в себя цифровую модель продуктивного горизонта и характеристики технологических объектов (нагнетательных и откачных скважин и т.д.). Наряду с параметрами технологических объектов в цифровую модель предприятия входят режимы их работы.

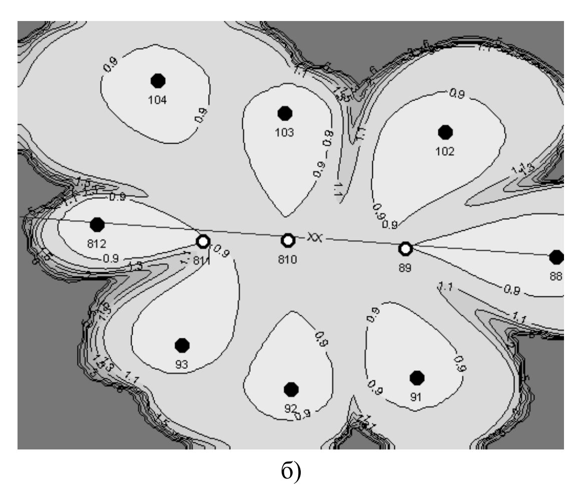
На третьем этапе проводится прогнозный расчет эксплуатации месторождения. Основой для проведения расчета является цифровая модель предприятия. При расчете моделируются как гидродинамические, так и физико-химические процессы, протекающие в системе рабочий раствор – подземные воды – вмещающая порода. Результатом расчета являются масса извлеченного урана и сопутствующих компонентов, расход реагентов (серная кислота и т.д.), оставшиеся запасы урана в продуктивном горизонте, а также другие характеристики разработки месторождения. На основании прогнозного расчета делаются выводы о целесообразности разработки месторождения данным способом. Если способ не отвечает необходимым требованиям, то проводится повторение третьего и/или второго этапов с целью поиска более приемлемых схем разработки месторождения. На основе совокупности проведенных прогнозных расчетов подготавливается технико-экономическое обоснование и рабочий проект строительства геотехнологического предприятия, содержащие экономическую оценку разработки месторождения, прогнозные расчеты загрязнения подземных вод, предложения по проведению природоохранных мероприятий и другую информацию, необходимую для разработки месторождения.

С помощью созданного геотехнологического информационно-моделирующего комплекса было проведено моделирование разработки блока Далматского месторождения урана, Россия. На основе данных о минералогическом, геологическом и гидрогеологическом строении продуктивного горизонта в технологических скважинах, с помощью процедуры интерполяции, была создана цифровая модель блока месторождения. Физико-химические параметры определялись на основе сравнения результатов компьютерного моделирования и данных двухскважинноного опыта. Моделировалась разработка блока, включающего в себя три откачных и восемь нагнетательных скважин. При этом использовались реальные характеристики скважин и режимы их работы. Распределение концентрации урана в жидкой фазе и водородного показателя pH в продуктивном горизонте, полученные спустя 1440 сут. после начала эксплуатации, приведены на рис. 2. На рис. 3 приведено сравнение интегральных технологических показателей (массы откачанных урана и серной кислоты), полученных в ходе опытной разработки блока Далматского месторождения и компьютерного моделирования. Хорошее соответствие расчетных и экспериментальных результатов подтверждает адекватность модели и правильность расчетов разработки месторождения методом ПВ.

Разработан геотехнологический информационно-моделирующий комплекс, позволяющий моделировать разработку месторождения урана методом подземного выщелачивания. Используемая в программном комплексе математическая модель адекватно описывает физико-химические процессы в продуктивном горизонте при сернокислотном выщелачивании урана. Программный комплекс может быть использован при проектировании и разработке месторождений урана методом ПВ для увеличения доли извлеченного урана, уменьшения расходов на единицу продукции и минимизации загрязнения подземных вод. На существующих месторождениях, разрабатываемых с помощью ПВ, его можно использовать для обоснования ввода в эксплуатацию новых скважин, подбора режима эк-

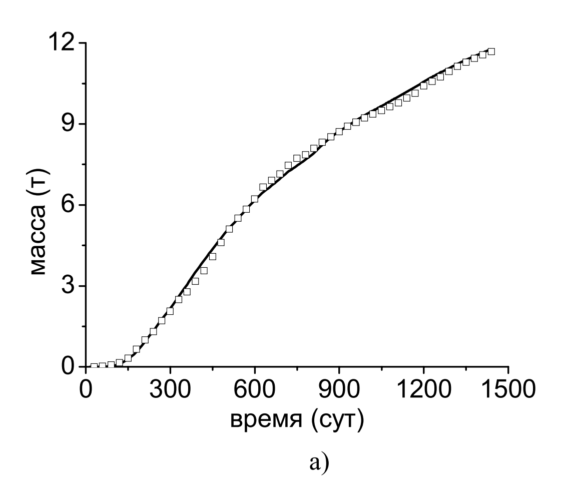


а)

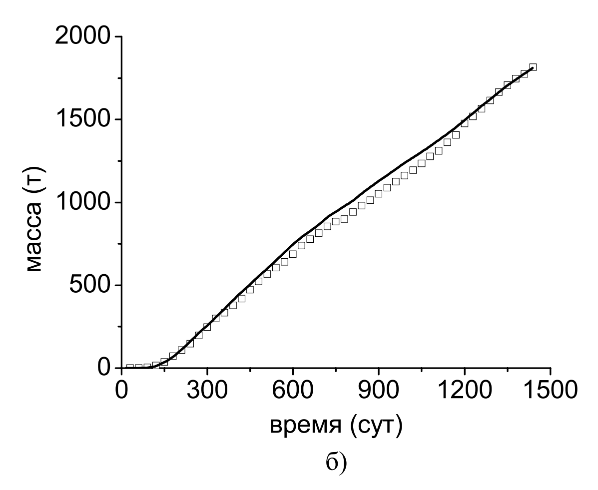


б)

Рис. 2. *Распределения концентрации урана в жидкой фазе (а) и водородного показателя pH (б) в продуктивном горизонте после разработки блока Далматского месторождения в течение 1440 сут*



а)



б)

Рис. 3. *Сравнение показателей разработки блока Далматского месторождения и результатов компьютерного моделирования: а) масса извлеченного урана; б) масса откачанной серной кислоты, □ – экспериментальные данные, —— – результаты моделирования*

сплуатации скважин, обеспечивающего максимальное извлечение урана при минимальных затратах. На разведанных месторождениях ГТИМК может быть использован для определения оптимального расположения нагнетательных и откачных скважин, подбора режимов эксплуатации скважин, обеспечивающих максимальную эффективность разработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лаверов Н.П., Абдульманов И.Г., Бровин К.Г. и др. Подземное выщелачивание полиэлементных руд. – М.: Изд-во Академии горных наук, 1998. – 446 с.
2. Белецкий В.И., Богатков Л.К, Волков Н.И. и др. Справочник по геотехнологии урана. – М.: Энергоатомиздат, 1997. – 672 с.
3. Перельман А.И. Геохимия эпигенетических процессов. – М.: Недра, 1965. – 272 с.
4. Кошколда К.Н., Пименов М.К., Атакулов Т. и др. Пути интенсификации подземного выщелачивания. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 224 с.
5. Жиганов А.Н., Носков М.Д., Истомин А.Д., Кеслер А.Г., Чеглоков А.А. Построение геотехнологической информационно-моделирующей системы для управления разработкой месторождения методом подземного выщелачивания // Проблема управления и моделирования в сложных системах: Труды III Междунар. конф. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2001. – С. 588–593.
6. Лукнер Л., Шестаков В.М. Моделирование миграции подземных вод. – М.: Недра, 1986. – 208 с.
7. Шейдеггер А.Э. Физика течения жидкостей через пористые среды. – М.: Гостоптехиздат, 1960. – 250 с.
8. Волобой В.И., Сынах В.Ю. Применение ГИС-технологий в численном моделировании гидрогеологических процессов // Проблемы и перспективы использования геоинформационных технологий в горном деле: Докл. II Междунар. научно-практ. конф. – Днепропетровск, 2000. – С. 72–77.
9. Истомин А.Д., Носков М.Д., Кеслер А.Г. Геотехнологический информационно-моделирующий комплекс для моделирования разработки месторождения урана методом подземного выщелачивания // Практика применения научного программного обеспечения в образовании и научных исследованиях: Матер. межвузовской конф. – Санкт-Петербург, 2003. – С. 42–47.